

储能配置对高比例新能源电网频率稳定性的支撑作用

王 蓉 彭 森

内蒙古电力（集团）有限责任公司阿拉善供电分公司，内蒙古 阿拉善 750306

[摘要]新能源占比不断提高使传统电网频率稳定性受到挑战,而储能系统因快速响应的特性成为维持电网频率稳定的重要支撑手段。此文针对高比例新能源并网时的频率波动问题,系统地探讨储能系统在平衡功率、抑制频率扰动、提升调频响应能力上的技术机制和作用效果并构建不同场景下适用的储能配置方案,分析其对电网稳定运行的促进作用,研究显示合理配置储能容量与控制策略能让新能源电网频率稳定性显著提升且工程应用价值和推广前景较强。

[关键词]新能源电网; 储能系统; 频率稳定; 调频响应; 电力系统平衡

DOI: 10.33142/hst.v8i7.17102

中图分类号: TM721

文献标识码: A

The Supporting Role of Energy Storage Configuration in the Frequency Stability of High Proportion New Energy Grids

WANG Rong, PENG Miao

Alxa Power Supply Company of Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd., Alxa, Inner Mongolia, 750306, China

Abstract: The continuous increase in the proportion of new energy has challenged the frequency stability of traditional power grids, and energy storage systems have become an important means of maintaining grid frequency stability due to their fast response characteristics. This article systematically explores the technical mechanisms and effects of energy storage systems in balancing power, suppressing frequency disturbances, and improving frequency response capabilities when high proportion new energy is connected to the grid. Suitable energy storage configuration schemes are constructed for different scenarios, and their promotion effect on the stable operation of the power grid is analyzed. The study shows that reasonable allocation of energy storage capacity and control strategies can significantly improve the frequency stability of the new energy grid, and have strong engineering application value and promotion prospects.

Keywords: new energy grid; energy storage system; frequency stability; FM response; power system balance

引言

风能、太阳能等新能源在电力结构里的比重不断增大,这使得其波动性和不可控性严重威胁电网频率稳定,并且传统火电调频方式响应慢、调节范围小难以满足现代电网需求,而储能技术具有快速充放电和智能控制的优势,为高比例新能源场景下的频率稳定开辟了新路径,本文从储能技术支持频率调节的作用机制入手,探讨不同储能配置策略缓解频率波动的能力,还提出适应未来电网发展的优化建议。

1 储能系统的基本构成与频率支撑原理

1.1 储能系统主要类型与性能特性

现代电力系统中,储能系统重要的支撑技术,按能量转换方式分有电化学储能、机械储能和热储能等类型,其中电化学储能以锂离子电池、钠硫电池、铅酸电池等为代表,能量密度高、响应快且安装灵活,在电网调频、削峰填谷和应急备用等场景广泛应用,调频市场中锂电池应用最普遍,其具有毫秒级响应能力,应对新能源引发的快速频率波动很合适,机械储能方面抽水蓄能和飞轮储能在大规模系统平衡上有独特优势,抽水蓄能靠高低水位能差转换能量,技术成熟安全但受地理条件限制大,适用于大电网长期运行优化,飞轮储能用高速旋转的转子存动能,

极短时间能高频次充放电,适用于微电网或局部频率快速响应的地方,热储能主要配合热电联产或光热发电系统,通过相变材料或高温介质吸收和释放能量,响应速度虽慢些,但在负荷调节和运行优化上有一定补充作用,储能类型各有特性,工程应用中常综合电网规模、调节时效性要求、经济性因素来配置以达到最佳频率支撑效果。

1.2 电网频率波动的成因与调节要求

系统内有功功率的平衡状态由电网频率反映,发电侧和负荷侧瞬时不匹配往往会使其产生波动,负荷突然上升或者发电出力骤减的时候,系统有功功率供不上求电网频率就下降,反过来频率就升高,高比例新能源接入的情况下,风电和光伏的波动性、不可控性使得频率不稳定的情况明显加重,风速变化或者日照强度波动能在很短时间内让新能源出力剧烈波动使频率快速偏离额定值,传统电源特别是火电机组调节惯性大、调频响应滞后,短时间内很难完成频率恢复任务,而且新能源机组大多通过电力电子接口接入电网没有物理惯量,这又进一步降低系统频率稳定能力,要保证电网安全可靠运行,频率调节系统得有高速响应、灵活分布、高精度调节的能力,新能源渗透率在30%的地区,频率波动问题是制约系统调度和安全运行的关键挑战,迫切需要靠先进的储能系统有效应对。

1.3 储能对频率调节的响应机制

储能系统能实时监测系统频率的微小波动,在毫秒至秒级响应时间内快速释放或吸收功率从而让频率实现动态平衡,电网频率低于设定阈值时储能系统会迅速向电网注入有功功率使系统频率提高反之它就吸收电网功率让频率降低,本质上这是构建一个动态可控的“调频源”来弥补新能源电源响应滞后和惯量不足的问题,一次调频时储能系统常基于本地测量信号进行下垂控制主动修正频率偏移,二次调频时它和调度中心通信按指令调整出力有计划地恢复频率,有些高性能储能还能提供“虚拟惯量”功能,控制系统模拟传统旋转电机的惯性响应曲线在频率变化初期提供惯量支撑止住频率跌落速率。

2 高比例新能源电网的频率稳定挑战

2.1 新能源并网带来的频率扰动特性

风能光伏等新能源在电力系统里占比不断攀升让电网频率稳定面临严重挑战,新能源出力具有不确定性和随机性,风速变化对风电影响很大,短时间内风速波动发电功率就会剧烈改变,日照强度、云层遮挡等因素主要影响光伏使其具有明显的日间周期性和与天气有关的瞬时波动特征,新能源输出和负荷需求很难实时匹配由上述特性造成这容易使电网频率偏移,极端情况下还会触发保护机制引发脱网事故,并且大多数新能源电源经电力电子设备并网,它们不像传统发电机组那样有旋转惯量与同步特性,系统整体惯量水平下降,负荷突变或者新能源输出骤减时系统频率变化速率(RoCoF)会明显加快,频率稳定裕度缩小,调频响应就得达到更高要求,特别是新能源装机容量占比超40%的地区,电网频率控制系统受到这种扰动的系统性压力,必须有更灵敏、更快速的辅助调节手段来支持才行。

2.2 传统电源调频的局限性

传统电网结构里,主要的调频任务由火电机组和水电站承担,火电机组靠汽轮机调速系统达成自动调频,其出力稳定、调节能力强,但可响应时间往往是数十秒到数分钟,难以应对新能源引发的快速频率波动,而且煤电灵活性差、最低出力限制高,频繁调节会损害设备寿命和燃料效率,限制了火电机组调频能力的发挥;水电调频响应速度虽快,不过水资源调度和地理条件对其有限制,调频容量和持续时间受限明显,高比例新能源接入时,传统电源调频负担变大,无法满足高频率、高幅度波动的实时补偿需求,特别是“弃煤保绿”趋势下,火电机组出力空间变小,调频资源更稀缺,调频服务能力出现缺口,传统机组也提供不了虚拟惯量,在低惯量电网下做不到快速频率支撑,新能源快速接入时调节能力滞后明显,这一结构性矛盾对频率稳定影响很大,是个重要隐患,急需用储能或者新型电源来补充传统调频手段的不足,优化升级电网运行机制。

2.3 频率稳定性对电网安全运行的重要性

电力系统稳定运行的关键指标之一是电网频率,它体现着系统中有功功率供需平衡的动态状况,一旦电网频率偏离额定值太多,电气设备正常运行会受影响且可能引发连锁故障与大规模停电事故。在大电网结构里,发电单元、电网设备以及负荷系统都是按照50Hz(或60Hz)额定频率设计运行的,要是频率偏差超出允许范围,或许就会出现同步失稳、电机失步、继电保护误动作等问题。新能源比例逐年增加使电网结构变得复杂,在此情况下频率稳定性更加重要,高比例新能源电网惯量低、扰动快、波动频率高,要是缺乏及时准确的频率调节能力,系统频率就会频繁波动甚至触发安全阈值,频率如果跌到48.5Hz以下,部分机组会保护性脱网,形成连锁反应,可能发展成区域性电力崩溃,电网要安全运行,系统就得设定严格的频率控制指标与调频策略,以便对短时扰动快速响应,对长时波动持续调节。

3 储能配置策略与典型响应模式

3.1 储能容量配置的优化方法

储能系统频率调节的实际效果,控制策略是一方面,而合理的容量与功率配置也非常关键,容量配置对调节持续时间影响大且功率配置决定瞬时响应能力。高比例新能源接入电力系统时,储能系统配置需考虑网架结构、新能源出力特性、负荷波动规律等多种因素,一方面要根据历史负荷数据和新能源发电出力曲线,评估最大频率偏差值与调频时间窗口,由此反推储能所需功率和能量容量,另一方面要结合节点位置、电网惯量分布和电压支撑需求,优化储能在系统中的分布布局。实际应用中可用灵敏度分析法或者多目标优化算法,对不同储能布点方案进行仿真比对,选出响应速度快、经济性高的最优配置,为提高系统弹性和稳定性,常采用“主储能+辅助储能”或者“集中+分布”组合模式,让系统在应对局部扰动和全网波动时都有良好调节能力。

3.2 不同调频模式下的储能控制策略

电网实际需求下,储能系统能参与多种调频控制模式,像恒频控制、虚拟惯量控制和负荷跟踪控制等,其中恒频控制模式大多以目标频率为参照,用下垂控制策略达成功率调节,系统频率一有偏离储能就自动增减输出以保稳定,这是当下工程里用得最多的调频法子,而虚拟惯量控制模拟传统同步发电机惯性响应,靠储能控制器引入惯量参数,让系统遇频率突变时快速释放或吸收能量,使频率响应速度加快且频率跌落速率(RoCoF)有效降低,在低惯量弱电网中特别适用,技术价值挺高,负荷跟踪控制更着眼于负载变化趋向,储能系统实时监测负荷数据,预测其变化趋向并提前调整功率输出以实现精准功率匹配,适合参与AGC调节或者电力市场辅助服务,调频精度和经济性都能提高。

3.3 典型调频场景下储能系统运行实例

实际工程里多种典型调频场景中储能系统作用显著,一次调频场景下风电出力因风速剧变骤降时系统频率快速下跌,数百毫秒内储能系统就能启动响应向电网注入有功功率把频率跌速控制于安全范围给二次调频争取响应时间,二次调频场景中区域负荷波动使系统频率长期偏离时储能系统与调度中心通信按指令调整输出帮忙把频率恢复到目标值,孤网运行或者微电网场景下储能更是维稳频率的核心资源,外部电网故障切断微电网电源与负荷失衡有风险储能系统瞬间就能接管频率支撑功能确保局部供电系统稳定运行,实际应用中某省电网调频辅助服务市场项目里大型锂电池储能装置秒级响应频率变化每年调频超 10000 次有效减少系统调频成本和传统机组运行负荷,某沿海风电基地飞轮储能和锂电池协同运行应对短期风电波动与长时功率缺口时调频性能优异。

4 储能支撑频率稳定的综合效果评估

4.1 系统频率指标的量化评价方法

科学合理的量化指标体系是评价储能系统对电网频率稳定性支撑效果的必要依据,像 RMS 频率波动值、频率恢复时间和调频裕度等属于常用指标。RMS 频率波动(RootMean Square)是反映一定周期内频率偏差平均波动强度的,在衡量系统频率稳定程度方面是重要的统计参数,且系统频率越接近稳定状态该值就越低。频率恢复时间是指频率从偏离状态恢复到额定值(50Hz)或者设定安全范围里所需的时间,直接体现储能系统的调频速度和响应能力,一般系统响应时间控制在数秒以内时支撑能力更强。调频裕度指的是系统里可用于调频的可调资源冗余程度,反映系统应对突发频率扰动的安全余量。除了这些核心指标,还可以引进频率偏差最大值($\Delta f_{\max}$)、频率波动率(df/dt)等辅助参数,再结合调度记录和仿真数据构建完整评价体系。多维度量化分析能全面评估储能在不同工况下的频率调节能力,并且能提供配置优化和策略制定的决策依据。

4.2 储能响应效率与经济性的权衡分析

储能系统提升频率稳定性有显著技术优势,但其推广应用面临高昂建设与运维成本的挑战,工程实施需兼顾响应效率和经济性以构建合理成本效益模型。储能的响应效率取决于单位时间功率调节能力与能量转换效率,锂电池等主流技术秒级就能切换功率输出且能量效率 90%,适合频繁调频任务,不过其使用寿命与充放电频次关系密切,频繁使用可能加速退化从而降低系统经济性。储能系统初期投资高,设备采购、系统集成、电气接入和土地建设等费用,一般占总成本 70%,还需考虑后期运营维护、电池更换、能量损耗和市场电价变化等因素。经济性分析常用全生命周期成本和投资回报率作为主要评价指标,也需

考虑调频收益、容量租赁、辅助服务市场补贴等正向收益因素以达成收益和成本的动态平衡,在调频资源短缺区域合理配置响应快、充放电灵活的储能系统,可在保障频率稳定地获取较高经济回报。

4.3 多储能协同与区域频率稳定提升策略

要进一步提升频率稳定性,构建多储能协同系统是一种趋势,不同类型储能系统技术优势和应用场景各有不同,合理组合就能形成互补协同、优化调度的运行机制,锂电池储能响应速度快,适合处理高频小幅波动,飞轮储能启动响应能力极快,毫秒级就能提供高功率输出,可应对极端频率扰动,抽水蓄能大容量且持续时间长,适合调节系统长期频率趋势,区域电网部署多类型储能系统就能达成“快响应+长支撑”的频率控制目标,并且还能结合分布式光伏、电动汽车 V2G 这些新型储能方式构建灵活分布的调频网络,调度策略上采用集中协调和区域自治相结合的控制体系,通过主站和储能控制器双向通信可实现不同储能间的协同控制,在频率波动初期飞轮储能快速响应来提供虚拟惯量,中期锂电池维持频率稳定,后期抽水蓄能接替调节任务,从而实现多阶段平滑过渡。

5 结语

新能源比例不断提升使电网频率稳定性遭遇前所未有的挑战,储能系统因有快速响应、灵活调节的优势而在电力系统频率控制方面成为重要支撑手段。本文从储能系统的构成和响应机制入手,系统分析新能源接入时频率扰动的特性以及传统调频手段的局限,提出多维储能配置策略与控制模式并用典型运行场景验证其调频效果,经过量化指标评估和经济性分析进一步确定储能在高比例新能源电网中的技术价值和实践路径。

[参考文献]

- [1]王一振,裴艾斐,王之谦,等.以新能源为主导的海上独立电网储能优化配置方法研究[J].电网技术,2025(6):1-12.
- [2]周行,王慧,李昕芮,等.离网型新能源制氢系统中的储能配比[J].南方能源建设,2025,12(3):154-162.
- [3]柯东鹤.基于改进布谷鸟算法的高比例新能源配电网储能容量优化配置[J].机电技术,2024(6):22-26.
- [4]杨尔成.超高比例新能源弱电网系统供电关键问题研究[J].中国战略新兴产业,2024(35):95-98.
- [5]贺悝,郭罗权,谭庄熙,等.高比例新能源电网中储能调频死区优化设定控制策略[J].电力系统保护与控制,2024,52(18):65-75.

作者简介:王蓉(1993.7—),女,毕业于大连理工大学,大学本科,中级工程师,研究方向:电气工程及其自动化;彭森(1988.9—),女,毕业于大连理工大学,本科学历,中级工程师,研究方向:计算机通信。